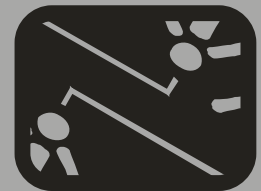


PLANIFICACIÓN DE REDES DE TDT MÓVIL DVB-H EN ENTORNOS URBANOS MEDIANTE SIMULATED ANNEALING



AUTOR

Jorge Martín Fernández
Ing. de Telecomunicación
Investigadores del Grupo
de Comunicaciones Móviles
Universidad Politécnica de
Valencia - Instituto de Tele-
comunicaciones y Aplicacio-
nes Multimedia
jormarfe@teleco.upv.es
ESPAÑA

AUTOR

David Gómez Barquero
Ing. de Telecomunicación
Investigadores del Grupo
de Comunicaciones Móviles
Universidad Politécnica de
Valencia - Instituto de Tele-
comunicaciones y Aplicacio-
nes Multimedia
dagobar@iteam.upv.es
ESPAÑA

AUTOR

Ariana Salieta Tecles
Ing. de Telecomunicación
Investigadores del Grupo
de Comunicaciones Móviles
Universidad Politécnica de
Valencia - Instituto de Tele-
comunicaciones y Aplicacio-
nes Multimedia
arsatec@iteam.upv.es
ESPAÑA

AUTOR

Narcís Cardona Marcet
PhD. en Telecomunicación
Investigadores del Grupo
de Comunicaciones Móviles
Universidad Politécnica de
Valencia - Instituto de Tele-
comunicaciones y Aplicacio-
nes Multimedia
ncardona@dcom.upv.es
ESPAÑA

Fecha de Recepción del Artículo: Abril 17 de 2008

Fecha de Aceptación del Artículo: Mayo 23 de 2008

Artículo tipo 1

RESUMEN

Este artículo presenta y analiza el problema de planificación de redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) móvil basadas en el estándar DVB-H, empleando para ello tanto transmisores sincronizados como gap-fillers, y propone un algoritmo de planificación basado en la técnica de optimización del Simulated Annealing (SA). El SA es un proceso de optimización discreto basado en el método de templado (annealing) de la metalurgia. La característica más importante del SA es que un estado peor puede ser aceptado, y de esta manera se puede "escapar" de un mínimo local. A menudo se dice que mientras que es muy fácil hacer que el SA funcione, es difícil hacer que funcione bien.

El objetivo del algoritmo realizado es minimizar el coste de despliegue de red para un objetivo de cobertura dado, optimizando al mismo tiempo la potencia transmitida por ambos tipos de emisores y el azimut de las antenas transmisoras de los gap-fillers. En el artículo se presenta el ajuste realizado al algoritmo para adaptarlo al problema de optimización y los resultados obtenidos, comparándolos con los del algoritmo genético multiobjetivo, en un escenario real (ciudad de Valencia en España). Finalmente, se demuestra que el SA obtiene mejores resultados que el algoritmo genético.

PALABRAS CLAVE

Redes de televisión digital terrestre móvil DVB-H,
Planificación de red, Simulated Annealing

ABSTRACT

This article presents and analyzes the problem of DVB-H based mobile TV network planning using synchronized transmitters and gap-fillers, and proposes an algorithm based on the technical planning optimization called Simulated Annealing (SA). The SA is a discrete process of

optimization based on the method of annealing in the metallurgy. The most important characteristic of the SA is that a worse state can be accepted, and by this way the SA is able to "escape" from local minimum. It is generally acknowledged that it is relatively easy to make the SA work, but it is difficult to make it work well.

The objective of the algorithm accomplished is to minimize the network deployment costs for an objective of coverage, optimizing at the same time the power transmitted by both type of transmitters and the azimuth of the transmitting antennas of the gap-fillers. The article presents and analyzes the necessary adjustments of the algorithm for adapt it to the problem of optimization and the results obtained by the SA in a realistic scenario (city of Valencia, Spain). These results are compared with the results of the genetic multi-objective algorithm (NSGA-II, Non-dominated Sorting Genetic Algorithm). Finally, it shows that the SA gets better results than the genetic algorithm.

KEYWORDS

DVB-H based mobile TV network, Minimize the network deployment costs, Simulated Annealing

INTRODUCCIÓN

Dentro de las comunicaciones móviles multimedia, el máximo exponente a día de hoy es la TV móvil. Recientes estudios de mercado han revelado un elevado interés por parte de los consumidores. Estos servicios son además clave para el desarrollo de la Sociedad de la Información, ya que permiten el acceso universal a contenidos multimedia en cualquier lugar y momento.

Aunque los operadores de telefonía móvil han empezado recientemente a ofrecer servicios de TV móvil, el mayor potencial para proporcionar estos servicios lo representan las redes de Televisión Digital Terrestre (TDT) diseñadas específicamente para servicios móviles (redes de TDT móvil). Sólo estas redes tienen las capacidades necesarias para soportar un consumo a gran escala de este tipo de servicios, ya que pueden distribuir servicios multimedia de banda ancha a grandes audiencias cubriendo extensas áreas sin limitación alguna en el número de usuarios que acceden al servicio de manera simultánea dentro del área de cobertura.

Una de sus principales características es que permiten crear redes de frecuencia única SFN (Single Frequency Network), en la que todos los transmisores y repetidores transmiten la misma señal a la misma frecuencia, de tal modo que los terminales pueden recibir la señal proveniente de varios emplazamientos.

El estándar europeo de TDT móvil es conocido como DVB-H (Digital Video Broadcasting – Handhelds), el cual

es una evolución tecnológica del estándar de TDT, DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial), adaptado para terminales móviles [3]. Fue diseñado originariamente para trabajar en UHF y proporciona capacidades de 5 a 10 Mb/s en canales de 8 MHz. Mantiene la capa física de DVB-T, y añade nuevos elementos en la capa de enlace, siendo posible reutilizar la infraestructura de red (transmisores, multiplexores etc.). Su principal característica es que emplea una técnica de transmisión discontinua en la que la información se transmite a ráfagas, lo cual reduce considerablemente el consumo de potencia medio de los terminales. Además, añade un mecanismo de corrección de errores adicional en la capa de enlace, el cual proporciona una mayor robustez a la transmisión. Actualmente ya se ofrecen servicios comerciales de DVB-H en Italia, Finlandia, Albania, India, Nigeria, Filipinas y Vietnam.

Una de las mayores preocupaciones sobre DVB-H es la gran cantidad de infraestructura de red necesaria para proporcionar niveles aceptables de cobertura. Como las redes de TDT están diseñadas para recepción mediante antenas directivas fijas en los tejados de los edificios, se requiere mucha más infraestructura de red que la existente de TDT para compensar las mucho más severas condiciones de recepción características de DVB-H, sobre todo para situaciones de recepción en interiores (indoor) y en automóviles (vehicular) [4]. Esta penalización es particularmente evidente para niveles de cobertura muy elevados (i.e., mayores que el 90%) [1]. Además, el coste del despliegue de red no sólo representa la mayor parte de los gastos de capital CAPEX (capital expenditure), sino que su mantenimiento representa una parte significativa de los gastos operativos OPEX (operational expenditure).

Como la construcción de nuevos emplazamientos de radiodifusión es muy costosa, un aspecto clave para minimizar el coste del despliegue de red es reutilizar la infraestructura de los emplazamientos celulares existente [5]. De este modo, los emplazamientos celulares pueden ser utilizados como complemento de las grandes torres de TV y Radio para colocar transmisores o gap-fillers de baja/media potencia, formando redes SFN con una alta densidad de emplazamientos. Esta solución además resulta en una mejora del nivel de cobertura, así como una distribución más uniforme, debida al hecho de que muchos lugares reciben la señal procedente de varios emplazamientos.

Mientras que los transmisores se sincronizan mediante una señal GPS, y reciben la señal en banda base a través de una red independiente (enlace radio o red digital) para posteriormente modularla, amplificarla y transmitirla; los gap-fillers reciben la señal RF de emisores de la propia red (ya sea un transmisor sincronizado o un gap-filler), y la retransmiten en la misma frecuencia tras

amplificarla. Los transmisores proporcionan mayores prestaciones y mayores niveles de cobertura, ya que pueden utilizarse para transmitir potencias elevadas. Sin embargo, pueden suponer una gran inversión para un emplazamiento de baja potencia. La principal ventaja de utilizar gap-fillers es que tienen un menor coste y complejidad, ya que su equipamiento e instalación son más sencillos. Sin embargo, los gap-fillers son un sistema realimentado, por lo que la potencia máxima transmitida está limitada, y por tanto el nivel de cobertura.

La principal restricción viene dada por el acoplo entre la antena transmisora y la receptora, por lo que es fundamental utilizar técnicas de cancelación de ecos. Además, los gap-fillers introducen una degradación en la calidad de la señal retransmitida, así como un retardo temporal adicional. Por lo tanto en general serán necesarios varios gap-fillers para obtener la misma cobertura que un transmisor. La idoneidad de utilizar un transmisor o un gap-filler dependerá del emplazamiento en particular y del coste relativo de estos.

El problema de planificación es un problema de optimización discreto, en el que hay un conjunto de emplazamientos posibles que utilizar. En este artículo se propone un algoritmo de optimización multiobjetivo basado en la técnica del Simulated Annealing (SA). Esta técnica de optimización fue propuesta por Agnes Ligeti [8] para la planificación de redes SFN de TDT, y actualmente está considerada como la técnica de optimización de referencia para temas de planificación de TDT.

En el artículo se explica el ajuste que hay que realizar en el algoritmo para realizar la planificación de TDT móvil y el funcionamiento de todos sus parámetros internos.

1. PLANIFICACIÓN DE UNA RED DE TELEVISIÓN DIGITAL MÓVIL

La planificación de red de DVB-H es, en cierta medida, similar a la planificación de red de DVB-T. Sin embargo, requiere una metodología diferente, ya que no se considera una recepción fija mediante antenas en los tejados, sino recepción móvil en exteriores (pedestrian outdoor) e interiores (pedestrian indoor), y en vehículos (vehicular). Además, se requieren muchos más emplazamientos, así como la utilización de transmisores y gap-fillers de baja potencia. En este sentido, la reutilización de la infraestructura de red de telecomunicaciones existente (tanto la de radiodifusión como la celular) es clave para minimizar el coste y evitar la construcción de nuevos emplazamientos.

Por lo general, el objetivo de planificación es proporcionar un nivel mínimo de calidad de la señal sobre el área de servicio (cobertura) minimizando el coste del despliegue de red. En el caso particular de DVB-H, en primer lugar normalmente se reutilizarán los emplazamientos de radiodifusión existentes empleando los máximos niveles de potencia posibles sin interferir en las transmisiones de TV analógica y TDT existentes.

La planificación de red consistirá por tanto en decidir, dado un conjunto de emplazamientos posibles (principalmente emplazamientos celulares de telefonía móvil) y una frecuencia de operación de la red conocida, qué emplazamientos utilizar, el tipo de emisor en cada emplazamiento (transmisor o gap-filler), así como su configuración individual (especialmente la potencia transmitida, pero también el azimut de la antena transmisora, a qué emisor enganchar el gap-filler, etc.).

Para ello es necesario estimar el nivel de cobertura de cada una de las diferentes configuraciones de red posibles en la región donde se quiere desplegar una red DVB-H (área de servicio), así como un modelo de coste, que proporcione el coste de utilizar los distintos tipos de transmisores y gap-fillers considerados en cada emplazamiento posible. Debido a las numerosas combinaciones posibles, el problema de planificación de red se traduce en un complejo problema combinatorial en el que es imposible estudiar todas las configuraciones de red posibles, por lo que es imprescindible utilizar algoritmos de planificación con un coste computacional aceptable.

1.1. Utilización de Repetidores

La principal ventaja de utilizar gap-fillers es que tienen menor coste y complejidad que los transmisores sincronizados, ya que el equipamiento e instalación de un gap-filler son más sencillos. Sin embargo, los gap-fillers presentan varias restricciones técnicas, como el acoplo entre la antena transmisora y receptora, debido fundamentalmente a que a la entrada del GF existen ecos provenientes tanto del camino de realimentación (debido a los lóbulos secundarios de las antenas), como de la reflexión en objetos del escenario estáticos (edificios) y dinámicos (vehículos). Existen algunas técnicas que tratan de mejorar este aspecto de los gap-fillers, como sería: aumentar la separación entre antenas, utilizar distintas polarizaciones en transmisión y en recepción, y situar elementos estructurales.

Las potencias transmitidas por los gap-fillers son en general menores que las de los transmisores

sincronizados (para evitar problemas de realimentación), por lo que son necesarios varios gap-fillers para obtener la misma cobertura que un transmisor sincronizado. Obviamente, la idoneidad de utilizar un transmisor sincronizado o un gap-filler dependerá del emplazamiento en particular, y en un despliegue en una zona urbana son necesarios ambos tipos de emisores. Cuando se activa en un emplazamiento un gap-filler se debe determinar a que transmisor o gap-filler se debe enganchar el receptor, así como la orientación de la antena transmisora (azimut).

Finalmente, el uso de gap-fillers implica ciertos efectos que se deben tener en cuenta. Estos efectos son básicamente el ruido y el retardo añadidos. La señal a la salida sufre en consecuencia una degradación adicional respecto a la señal de salida de los transmisores sincronizados. Es por esto que se deben contemplar unas pérdidas de implementación añadidas por el uso de gap-fillers.

La calidad de la señal a la salida de un gap-filler depende fundamentalmente de la calidad de la señal a la entrada del mismo. Por este motivo no se suelen enganchar muchos gap-fillers a la vez.

1.2. Estimación del nivel de cobertura

Para estimar el nivel de cobertura es necesario determinar cómo las señales transmitidas por los distintos emplazamientos contribuyen a la señal útil o a crear interferencias en el área de servicio. Se utiliza una función de ponderación que determina la contribución a la señal útil y a la interferencia de las señales recibidas por los distintos emisores según su tiempo de llegada al receptor [2]. También es necesaria una predicción de la potencia recibida en el área de servicio debida a cada uno de los emisores de la red.

Un punto (x,y) se considera cubierto si la CINR (Carrier-to-Interference plus Noise Ratio) supera cierto umbral mínimo (γ_0) , fijado por el modo de transmisión. Idealmente, se debería evaluar la cobertura en un número infinito de puntos. Sin embargo, suponiendo constante el nivel de potencia dentro de un área lo suficientemente pequeña, podemos determinar la probabilidad de cobertura, $p_c(x,y)$, en un área pequeña alrededor del punto (x,y) como la probabilidad de que la CINR supere el umbral mínimo, γ_0 :

$$P_c(x,y) = Pr \{ \Gamma(x,y) > \gamma_0 \} \quad (1)$$

1.3. Coste del despliegue de red

Para buscar configuraciones de red que minimicen el coste de despliegue se necesita establecer un modelo de

coste que considere las potencias de transmisión, energía eléctrica, cableado, equipamiento, adquisición de los emplazamientos, mantenimiento, etc. El modelo debe de tener en cuenta gastos de capital CAPEX y gastos operativos OPEX, por lo que las medidas de coste se deben definir para un intervalo de tiempo, como por ejemplo costes anualizados (i.e., coste por año).

Básicamente cada emplazamiento tendrá asociado un coste por utilizarlo (costes de alquiler, mantenimiento, cableado si procede, etc.), más un coste proporcional a la potencia transmitida (amplificadores, antena, electricidad, etc.) dependiendo de si se utiliza un transmisor o un gap-filler. Mientras que el coste proporcional a la potencia transmitida será en la práctica el mismo para todos los emplazamientos (para un tipo de emisor), el coste asociado a utilizar el emplazamiento en sí dependerá de cada emplazamiento en particular ya que unos emplazamientos pueden ser más caros que otros.

2. SIMULATED ANNEALING

2.1. Introducción

El Simulated Annealing (SA) es un proceso de optimización discreto basado en el método de cristalización de los materiales propuesto en los años 80 por Kirkpatrick [7]. Su simplicidad y buenos resultados lo han convertido en una herramienta muy popular para resolver una amplia gama de problemas de optimización combinatoria. El Simulated Annealing es una variante de la búsqueda local, que permite movimientos hacia estados que representan soluciones peores, y de esta manera evitar quedar atrapado prematuramente en un óptimo local. El nombre e inspiración viene del proceso de templado (annealing) en metalurgia.

2.2. Proceso del simulated annealing

Los algoritmos tradicionales de búsqueda local parten de una solución inicial, que de modo paulatino es transformada en otras al introducirles pequeñas perturbaciones o cambios. Si este cambio da lugar a una solución con mejor rendimiento que la actual, se sustituye ésta por la nueva, continuando el proceso hasta que no resulte posible realizar una nueva mejora. Esto significa que la búsqueda finaliza en un óptimo local, que no tiene por qué ser forzosamente el óptimo global. Un modo de evitar este problema es permitir que algunos movimientos sean hacia soluciones peores.

Pero si la búsqueda está realmente yendo hacia una buena solución, estos movimientos de "escape" deben realizarse de un modo controlado. En el caso del SA, esto se realiza controlando la frecuencia de movimientos de escape, mediante una función que hará disminuir la probabilidad de esos movimientos hacia soluciones

peores conforme avanza la búsqueda.

La probabilidad de que el algoritmo acepte peores soluciones depende de t . El parámetro t es un parámetro de control denominado temperatura, siguiendo la analogía con el proceso de enfriamiento físico. Una solución que suponga un incremento Δ en la energía se aceptará con la probabilidad $\exp(-\Delta E/t)$. Por tanto, si se permite que t alcance valores suficientemente pequeños, ya no habrá más movimientos a peores soluciones y la convergencia será a un óptimo local.

Si t decrece lo suficientemente lento, el proceso converge a la solución óptima absoluta. Sin embargo aumenta considerablemente el tiempo de cálculo. Por lo tanto, hay que tener un compromiso entre tiempo de optimización y la probabilidad de encontrar el óptimo absoluto (calidad de la solución).

Para poder implementar el algoritmo descrito anteriormente para un problema concreto, es preciso tomar una serie de decisiones. Estas decisiones se pueden dividir en decisiones genéricas y específicas. Las decisiones genéricas se refieren principalmente a cómo controlar la temperatura (incluyendo la definición de su valor inicial T_{max} y la función de decrecimiento αT), el número de iteraciones N_0 antes del decrecimiento de la temperatura.

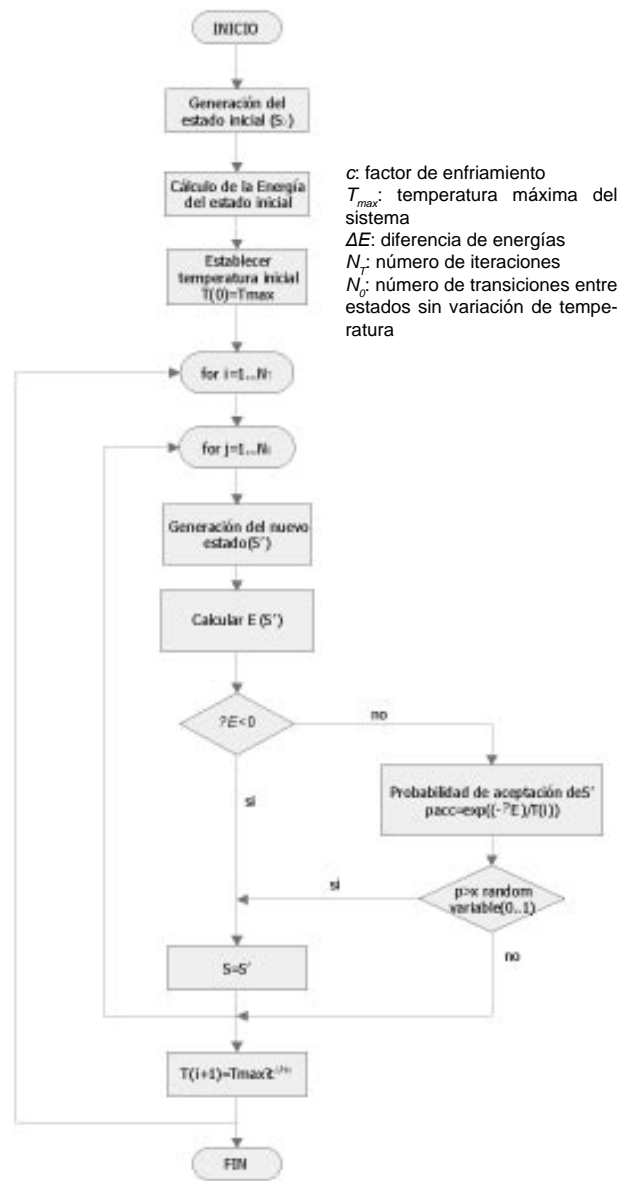
Las decisiones específicas comprenden la definición del espacio de soluciones, la función objetivo, y cómo se obtendrá la solución inicial. Ambos tipos de decisiones hay que tomarlas con cuidado, pues ejercen gran influencia sobre la calidad de las soluciones.

2.3. Estructura básica

Los pasos que debe seguir el algoritmo se muestran en la Figura 1. La optimización comienza con una elección aleatoria del estado inicial, con la máxima temperatura (T_{max}). Se calcula la energía del estado S ($E(S)$). A partir de este estado, se genera un nuevo estado (S') con una energía $E(S')$, aplicando un mecanismo de generación del estado siguiente NSG (Next State Generation). Dependiendo de la diferencia de energías (ΔE), si la nueva energía es menor que la anterior, se acepta el siguiente estado. En caso contrario la aceptación del siguiente estado depende de la probabilidad de aceptación:

$$P_{acc} = \begin{cases} 1 & E_{j+1} < E_j \\ \exp(-(E_{j+1} - E_j)/T) & E_{j+1} \geq E_j \end{cases} \quad (2)$$

Figura 1. Diagrama de flujo del SA.



En el bucle exterior, la temperatura del sistema decrece hasta que se alcanza la temperatura mínima (T_{min}). En cada iteración del bucle exterior se realiza varias veces (N_0) el cálculo del siguiente estado, energía y probabilidad de aceptación, sin variar la temperatura.

Al principio del proceso de enfriamiento (con una temperatura alta), un estado peor puede ser aceptado con una alta probabilidad. Conforme la temperatura disminuye la probabilidad de aceptación de nuevos estados con mayor energía decrecerá, y al final del proceso de enfriamiento sólo serán aceptados los estados que tengan menor energía. Durante el proceso de optimización se debe guardar la mejor solución encontrada, ya que es posible que al aceptar estados con mayor energía esta solución se pierda.

La definición de la función objetivo requiere de unas consideraciones importantes. Se tiene que expresar el problema de optimización como un problema de minimización de una función de energía. Por lo tanto, hay que conseguir expresar los objetivos de la planificación (cobertura y coste), con un solo valor por estado.

Asumiendo un proceso de enfriamiento exponencial, los parámetros del proceso de enfriamiento son: máxima temperatura inicial (T_{max}), la mínima temperatura (T_{min}), el factor de enfriamiento (c , este factor modela la velocidad a la que se va a producir el enfriamiento del sistema) y N_0 (número de transiciones entre estados sin variación de la temperatura).

Está generalmente aceptado que la solución inicial (S_0) debe ser generada de un modo aleatorio. En la práctica, se emplean diferentes semillas aleatorias desde donde iniciar la ejecución del algoritmo. Se parte de varias semillas debido a que es importante comprobar el comportamiento del Simulated Annealing desde un único estado inicial, sino desde varios estados distintos, y analizar de esta forma las soluciones a las que se llegan.

2.4. Parámetros del simulated annealing

- T_{max} : temperatura máxima o inicial del sistema. Este parámetro junto con T_{min} , N_0 y c determina la longitud del proceso de enfriamiento. La temperatura inicial es un parámetro importante, ya que una temperatura inicial elevada obliga al algoritmo a aceptar estados "peores" que el actual con una frecuencia alta, de manera que la energía oscilará mientras que la temperatura no haya superado un determinado umbral.
- T_{min} : temperatura mínima del sistema. Esta temperatura debe ser tal que un determinado empeoramiento de la función objetivo sea aceptado con una probabilidad comparable a cero.
- c : es el denominado factor de annealing. Este factor determina, junto a N_0 , la velocidad del proceso de enfriamiento.
- α : este parámetro marca la severidad que van a tener las penalizaciones en la función objetivo. α

no debe ser muy grande, debido a que las penalizaciones no deben ser demasiado severas.

- δ : es un offset que se introduce a la penalización en la función objetivo. Al igual que α , δ no debe introducir una gran penalización.
- N_0 : determina el número de transiciones entre estados sin variación en la temperatura y, junto con c , la velocidad del proceso de enfriamiento.

3. ALGORITMO DE PLANIFICACIÓN DVB-H

3.1. Función objetivo

La función objetivo es la parte fundamental de la técnica del Simulated Annealing, donde se marcan los objetivos de la optimización. En nuestro caso, el objetivo de la optimización es encontrar una configuración de red que consiga el nivel de cobertura deseado con un coste mínimo de despliegue, optimizando la potencia transmitida de los transmisores sincronizados y gap-fillers, y el azimut de la antena transmisora de los gap-fillers.

Como ya se ha comentado en el apartado 1.3, el modelo de coste que se emplea tiene en cuenta dos parámetros para cada emplazamiento: coste por utilización del emplazamiento (C_s) debido al equipamiento, alquiler del emplazamiento, mantenimiento, licencias etc, y un coste en función de la potencia transmitida (C_p). El coste total de una configuración de red ($C(s,p)$) es la suma del coste de cada transmisor.

El algoritmo contempla la utilización de dos tipos de emisores: transmisores sincronizados y gap-fillers. Pudiéndolos situar en un conjunto de posibles emplazamientos celulares dentro del escenario de despliegue. El algoritmo realizado también considera la posibilidad de tener como parámetro de entrada una configuración de red ya desplegada, a partir de la cual se realiza la planificación.

Cada emplazamiento celular se caracteriza por su posición, altura, rango de potencias de transmisión posibles (normalmente se define un rango de potencias diferente para transmisores sincronizados y gap-fillers, aunque no tiene porque ser así), configuración de las antenas, aislamiento, y coste (en función de la potencia de transmisión y de si se utiliza un transmisor o un gap-filler).

Los parámetros de entrada que tiene en cuenta el algoritmo para la planificación de la red son:

$$S=\{(X_k, Y_k)\} \quad K \in [1, S] \quad (3)$$

$$P=\{P_j^k\}, \quad i \in [1, P_{max}] \quad (4)$$

$$Az_{GF}=\{Az_{GF}^k\} \quad i \in [1, Az_{GF}^k] \quad (5)$$

donde S es un vector que representa la posición de los

emplazamientos celulares. En cada emplazamiento únicamente se puede implementar un emisor. P es un vector que indica el conjunto de posibles potencias. Az_{GF} es un vector que indica el conjunto de posibles direcciones de orientación de las antenas transmisoras de los gap-fillers.

Se ha considerado que el azimut de los transmisores sincronizados no varía, debido a que la ganancia que se obtendría es mínima por ser omnidirección. También se ha asumido que en tilt de los transmisores sincronizados no varía.

Para poder formular el problema de planificación, se han de definir las siguientes variables de decisión respecto a un emplazamiento (x_k, y_k) :

- $P_k \in [1, P_{max}]$ Indica la potencia radiada por el emplazamiento k .
- $a_{GFk} \in [1, Az_{GF}^k]$ Indica la orientación, en horizontal, de la antena transmisora de los gap-fillers.
- $e_k \in [0, S] \cup \{B\}$ Indica el emisor al que se engancha el gap-filler situado en el emplazamiento k . $e_k \neq k$. B hace referencia a la configuración base, que incluye tanto a la red de radiodifusión como a una posible configuración de red, a partir de la cual se realiza una planificación progresiva.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el algoritmo trata de minimizar el coste de despliegue de red sujeto a unos requisitos de cobertura. La formulación del problema de optimización es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 &\text{minimizar} && C(p) / C_{max} + \Lambda_{IL, \gamma}(p) \\
 &\text{Sujeto} && P_k \in [1, P_{max}] \quad \forall K \in [1, S] \\
 &&& a_{GFk} \in [1, Az_{GF}^k] \quad \forall K \in [1, S] \\
 &&& e_k \in [0, S] \cup \{B\} \quad \forall K \in [1, S]
 \end{aligned} \tag{6}$$

donde $C(p)$ es el coste total de la configuración de red, C_{max} es el coste máximo de la red y $\Lambda_{IL, \gamma}$ es la función de penalización de cobertura. Se puede observar que la optimización de las antenas (Az) no influye en el coste de la red, en ese caso el objetivo es maximizar la cobertura para la misma infraestructura de red.

La función de penalización se formula de siguiente forma:

$$\Lambda_{IL, \gamma} = \begin{cases} 0 & \text{Si } A^* = 0 \\ \alpha \cdot \frac{A^*}{A} + \delta \text{ resto} & \text{resto} \end{cases} \tag{7}$$

donde A^* es el número de puntos de test donde el requisito de cobertura no se cumple, $\Gamma(x, y) \leq \gamma_0$ (Apartado 1.2) y A es el número total de puntos de test. Los parámetros α y δ son constantes que determinan la severidad de la penalización.

3.2. Generación del estado siguiente

Una característica importante del SA es que el movimiento por el espacio de soluciones se caracteriza por unos pequeños pasos aleatorios caracterizados por pequeños cambios en la configuración de la red, cada paso da lugar a un nuevo estado. El Generador del Estado Siguiente (NSG) es el que define los estados vecinos, tiene un efecto importante en el comportamiento y resultado de la optimización. Para la generación del siguiente estado se elige al azar (con la misma probabilidad) entre uno de los siguientes métodos:

- *Random choice*: Se selecciona un transmisor aleatoriamente (activo o no activo) y se elige al azar un cambio de la potencia radiada o del azimut.
- *Birth-death*: Se elige un emplazamiento al azar. Si hay un transmisor, se elimina y si no hay ningún transmisor, se instala uno con la mínima potencia.
- *Move*: Se elige un transmisor activo al azar y se traslada a un emplazamiento que este vacío. Los valores de potencia y azimut deben ser lo más parecidos posibles a los que había en el emplazamiento original, pero deben ser elegidos de entre los posibles valores que permite el nuevo emplazamiento.
- *Local search*: Se escoge aleatoriamente uno de los parámetros de decisión (potencia o azimut) de un transmisor activo elegido aleatoriamente, y se busca el valor de este parámetro que obtenga el mínimo valor de la función objetivo.

3.3 Configuración del algoritmo

La configuración que se debe realizar de algunos de los parámetros internos, descritos en el apartado 2.4, se ha elegido igual que la que utilizaba Agnes en [8], debido a los buenos resultados obtenidos: $c=0.97$, $\alpha=5$, $\delta=0.5$, $T_{max}=10$.

Sin embargo, debido a que nuestro problema de planificación tiene un mayor número de variables de decisión que Agnes, tenemos un espacio de soluciones ($\approx 10^{200}$) mucho mayor que el considerado por Agnes ($\approx 10^{12}$). Por lo tanto, se ha modificado el valor de T_{min} de forma que halla un mayor número

de iteraciones, $T_{min}=10^{-5}$.

Se ha elegido que la velocidad del proceso de enfriamiento no sea un parámetro fijo durante la ejecución del algoritmo, ya que se ha observado que no es necesario tener una velocidad de enfriamiento constante, debido a que si vamos modificando esta velocidad se puede aprovechar las ventajas que tiene un proceso rápido y las de un proceso lento, aumentando de esta forma la eficiencia del algoritmo. La variable que se ha empleado para obtener un proceso variable es N_0 . En la Tabla 1 se puede observar que se ha dividido el proceso de enfriamiento en 5 partes.

Tabla 1. Variación de la velocidad de enfriamiento según la temperatura del sistema

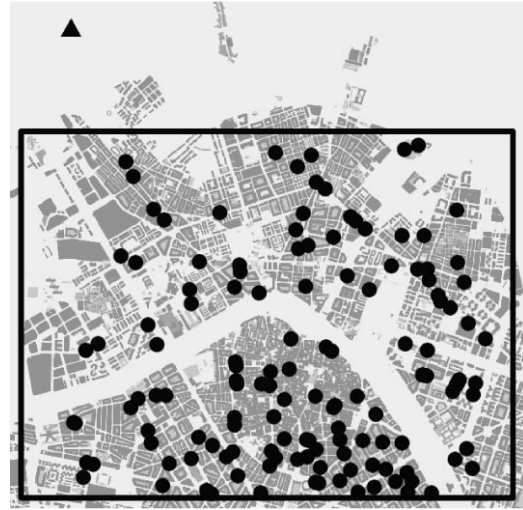
Intervalo de temperatura	N_0
$2 \leq T$	1
$1 \leq T < 2$	2
$0.1 \leq T < 0.1$	5
$0.0001 \leq T < 0.1$	9
$T < 0.0001$	15

Para elegir cada uno de los valores exactos de N_0 se fijó en primer lugar el ultimo valor ($N_0=15$) eligiéndose un valor mayor al que empleaba Agnes en [8] debido a que su espacio de soluciones es mucho menor, y posteriormente se eligieron el resto de valores de forma que el proceso de enfriamiento tuviera una variación suave y que el SA realizara las suficientes iteraciones como para llegar a la solución óptima.

4. ESCENARIO DE DESPLIEGUE

El escenario elegido para la planificación de la red DVB-H es el núcleo urbano de la ciudad de Valencia (España). El área del escenario es de 16 km² aproximadamente. En este escenario se han considerado 134 emplazamientos celulares disponibles para colocar tanto transmisores sincronizados como gap-filler como complemento a una torre de televisión. Los emplazamientos celulares están situados sobre los edificios a una altura de 3 m sobre los mismos y la torre de TV tiene una altura de 150 m. Se han considerado antenas sectorizadas para los transmisores sincronizados y antenas direccionales para los gap-filler. La Figura 2 muestra el escenario de despliegue y la ubicación de los emplazamientos (negro) y de la torre de Televisión (gris).

Figura 2. Escenario de despliegue y posición de los emplazamientos celulares (puntos) y torre de TV (triángulo).



Sobre este escenario se han ubicado 7600 puntos de test outdoor equiespaciados. La frecuencia de operación es 700 MHz. El tipo de recepción es en exteriores (pedestrian outdoor). Se ha utilizado la herramienta de planificación profesional Atoll para calcular las pérdidas de propagación utilizando mapas de elevación del terreno DTM (Digital Terrain Model) y mapas de altura de edificios.

El modo de transmisión elegido es el modo FFT 8K GI 1/4, modulación QPSK, tasa de codificación en la capa física 1/2, MPE-FEC 3/4. Este modo de transmisión requiere una CNR de 9.5 dB y ofrece una capacidad de 4.1 Mb/s.

Las posibles potencias que se han considerado para un transmisor son 100, 250, 500 y 1000 W, y para el caso de un gap-filler son 10, 20, 50 y 100 W. Se ha asumido que el azimut de las antenas transmisoras de los gap-fillers varía 40° a derecha e izquierda respecto a la orientación inicial de las mismas, con un paso de 5°.

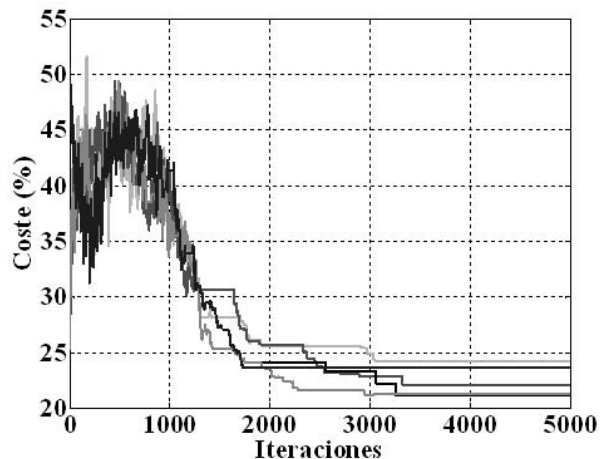
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En primer lugar se va a realizar un estudio de la configuración del algoritmo en función del número de iteraciones que realizar y número de semillas empleadas.

En la Figura 3 se observa que para el SA únicamente serían necesarias 3500 iteraciones para considerar que la solución obtenida es aceptable, debido a que a partir de ese punto no se producen mejoras en el coste. Hay que destacar que en la Figura 3 se observa el hecho de que el SA admite estados "peores" cuando la temperatura del sistema es alta, sin embargo cuando la temperatura comienza a ser baja el algoritmo descarta los estados

“peores” y se queda únicamente con aquellos que minimizan el coste para la cobertura de red objetivo.

Figura 3. Valores del coste de despliegue para cada semilla del SA.



En la Figura 4 y en la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en función del número de semillas simuladas. Se observa como según va aumentando el número de semillas el coste óptimo medio es menor y la desviación entre los costes va disminuyendo. Se puede asumir que únicamente serían necesarias 5 semillas para considerar que la solución obtenida es aceptable.

Figura 4. Soluciones obtenidas con el SA según el número de semillas.

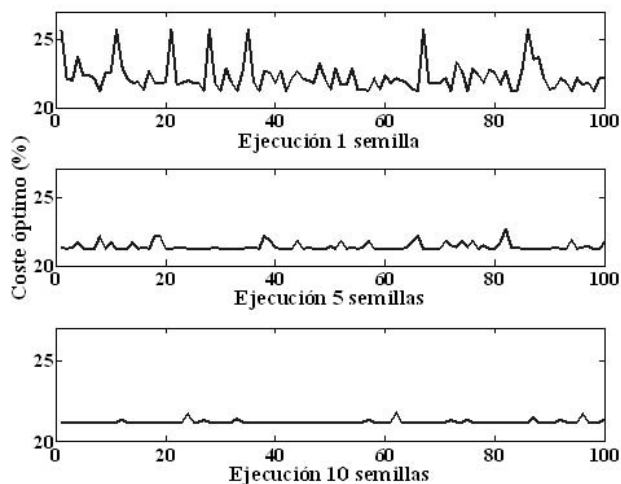
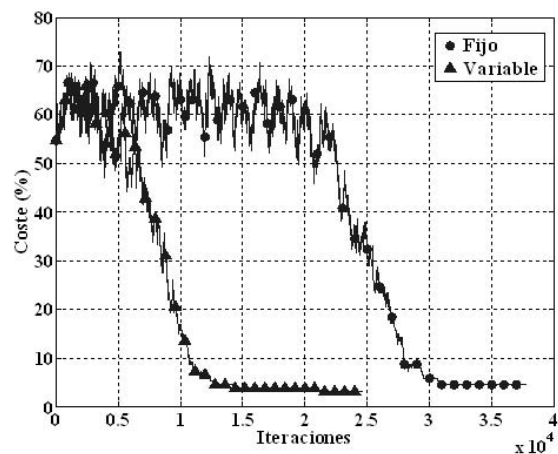


Tabla 2. Valores del coste óptimo medio y desviación típica con respecto al número de semillas.

	Media	Desviación típica
Ejecución 1 Semilla	22.4%	1.06
Ejecución 3 Semillas	21.5%	0.27
Ejecución 5 Semillas	21.4%	0.24
Ejecución 7 Semillas	21.2%	0.18
Ejecución 10 Semillas	21.2%	0.18

A continuación, se va a comparar el proceso de enfriamiento variable (apartado 3.3) con uno fijo, para la versión fija se ha utilizado $N_0=10$. Para ambos casos se ha fijado que el objetivo de cobertura es del 95%.

Figura 5. Valores del coste de despliegue para cada tipo de proceso de enfriamiento.

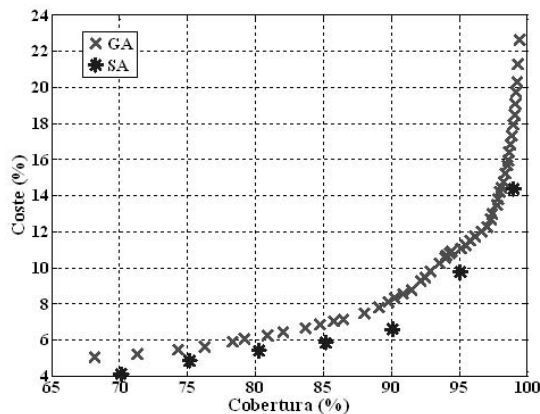


La Figura 5 muestra los valores del coste de despliegue durante la simulación para ambos procesos de enfriamiento. Se puede observar que el algoritmo que tiene el proceso de enfriamiento variable comienza mucho antes a reducir el coste de despliegue y llega a la solución óptima antes que la versión fija.

Finalmente, se van a comparar los resultados obtenidos con el SA con otro algoritmo de planificación DVB-H, el algoritmo genético multiobjetivo (NSGA-II) [6]. Los algoritmos genéticos se basan en los mecanismos de selección de la naturaleza por los que los individuos más aptos de una población son los que sobreviven.

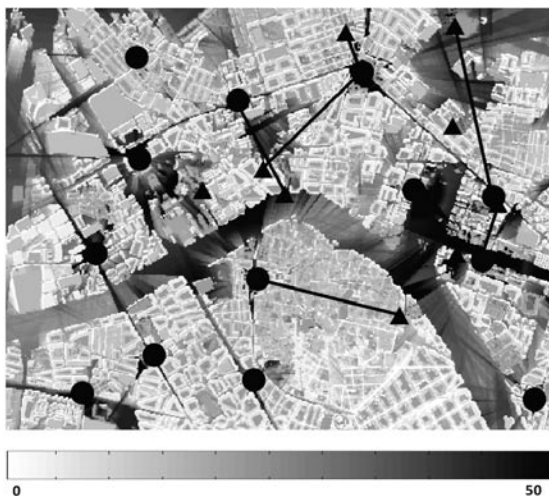
En la Figura 6 se muestran los resultados para el caso de realizar una planificación para distintos puntos de cobertura entre 70% y 95%, con un paso del 5%, y el 99%. Se observa que el SA obtiene mejores soluciones. Esto se debe a que el SA es capaz de obtener mejores soluciones que otros algoritmos cuando el espacio de soluciones es muy grande, ya que es capaz de "escapar" de los óptimos locales y encontrar el óptimo global.

Figura 6. Coste vs. Cobertura. QPSK 1/2



En la Figura 7 se muestra la distribución de SINR (dB) en el escenario de despliegue que proporciona la configuración de red obtenida con el SA para un 95% de cobertura. Se ha marcado con un círculo la situación de los transmisores sincronizados y con un triángulo la situación de los gap-fillers. Las líneas negras indican el transmisor sincronizado al que se engancha el gap-filler, los gap-filler que están enganchados a la torre de TV no tienen ninguna línea.

Figura 7: Distribución de la SINR (dB) para una cobertura del 95% obtenido con el SA.



6. CONCLUSIONES

El presente artículo presenta un estudio de la utilización de la técnica del Simulated Annealing para planificación de redes TDT móvil.

Por un lado se ha analizado el ajuste que se ha de realizar en el algoritmo para adaptarlo al problema de planificación de redes DVB-H. Se ha comprobado que es fácil conseguir que el SA funcione, sin embargo es bastante complicado conseguir que funcione correctamente, es decir, que llegue al óptimo global. Debido a que hay que ajustar un gran número de variables, así como el número de iteraciones, semillas, etc.

Se ha comprobado como el proceso de enfriamiento variable propuesto hace que el SA sea más eficiente en tiempo, consiguiendo llegar al óptimo global en menos iteraciones.

Por otro lado, se han comparado los resultados obtenidos mediante el SA con los obtenidos mediante el algoritmo genético. Comprobándose que el SA obtiene soluciones mejores, ya que es capaz de "escapar" de los mínimos locales, que pueda quedar atrapado el algoritmo genético.

7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio dentro del Proyecto FURIA (Futura Red Integrada Audiovisual) en el marco del Programa Plan Avanz@. Los autores quieren mostrar su agradecimiento al Instituto Cartográfico Valenciano.

8. REFERENCIAS

- [1] Bria A. and Gómez-Barquero D., "Scalability of DVB-H Deployment on Existing Wireless Infrastructure", (2005), Proc. IEEE PIMRC.
- [2] Brugger R. and Hemingway D., "OFDM receivers – Impact on Coverage of Inter-Symbol Interference and FFT Window Positioning", (2003), EBU Technical Review.
- [3] Faria G., Henriksson J., Stare E. and Talmola P., "DVB-H: Digital Broadcast Services to Handheld Devices", (2006), Proc. of the IEEE, vol. 94, no. 1, pp. 194-209.
- [4] Gómez-Barquero D. and Bria A., "Feasibility of DVB-H Deployment on Existing Wireless Infrastructure", (Oulu, 2005), Proc. IWCT.
- [5] Gómez-Barquero D., Bria A., Monserrat J. F., y Cardona N., "Minimal Cost Planning of DVB-H Networks on Existing Wireless Infrastructure", (Helsinki, Finlandia, 2006), Proc. IEEE PIMRC.
- [6] Gómez-Barquero D., Salieta A., Martin J. y Cardona N., "Planificación y Despliegue de Redes TDT Móvil DVB-H utilizando DVB-H", (2007), Telecom I+D.

[7]Kirkpatrick S., Gelatt C.D. and Vecchi M.P., "Optimization by Simulated Annealing", (1983), Science, vol. 220, no. 4598, pp. 13.

[8]Ligeti A. and Zander J., "Minimal Cost Coverage Planing for Single Frecuency Netwoks", (1999), IEEE Trans. Broadcasting.